

# 加工路径段进给速度的转接及加减速处理方法<sup>\*</sup>

陈良骥 冯宪章

(郑州航空工业管理学院机电工程学院, 郑州 450015)

**【摘要】** 针对高速高精加工对数控系统在进给速度控制方面的要求,根据相邻路径段间的转接角大小建立了可直接进行段间转接的条件,并研究了该条件不成立时对转接速度的修正问题。提出了段内加减速的处理基本原则,并在保持路径段长度不变的基础上对路径段内的进给速度重新进行规划,避免了以往插补前加减速方法中减速点和终点预测困难的问题。实际计算结果表明,相对零速度转接加减速处理方法,所提出的方法在同样保证加工精度等基础上提高了加工效率(每段约2%),在高速加工系统中可以得到较好应用。

**关键词:** 高速加工 进给速度 加减速 算法

**中图分类号:** TG659 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)01-0200-05

## Transiting and Acceleration/Deceleration Methods for Feed-speed of Machined Path Segments

Chen Liangji Feng Xianzhang

(School of Mechatronics Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China)

### Abstract

In order to meet the requirements of numerical control system to control feed-speed in high-speed and high-accuracy machining, the conditions of direct transiting under the adjacent path segments are determined, and the correcting problem of turning speed is researched according to the transiting angle when the conditions are not feasible. The dealing principle of acceleration/deceleration in one segment is presented and the feed-speed is re-planned under the basis of invariableness length. The trouble of forecasting deceleration point and end point using the past methods is avoided. The result of practical computation indicates that the proposed method, relative to the method of turning speed '0', enhances the machining efficiency(about 2% per segment) based on assuring accuracy and could be well applied to high-speed machining system.

**Key words** High-speed machining, Feed-speed, Acceleration/deceleration, Algorithm

### 引言

高速加工是数控加工的发展趋势之一<sup>[1]</sup>。数控编程时为获得较高的逼近精度,加工路径段长度一般取得较短,从而加大了数控程序段的数量。为达到高速加工目的,数控系统应具备加工路径段信息高速处理能力,即对加工路径段进给速度的前瞻处理能力。

文献[2~4]提出了加工路径段段内的加减速

处理方法,这些方法一般都将每条加工路径段的起点和终点处理为瞬时静止状态(起点和终点进给速度为零)。由于频繁地从零加速又减速至零,也会相应延长每段加工路径的运行时间,这在加工路径段数量较大时体现得更为明显。另外,现行加减速处理方法在减速点和终点识别方面也存在不足。文献[5]通过实时计算当前插补点与编程目标终点间距离来判断是否到达减速点,但该方法可能存在距离的精确计算及实时插补计算量等问题。文献[6]

提出了一种确定终点的方法,在一定程度上减少了进给速度变化产生的机械冲击,但该方法并不能保证实际加工的终点位置和加工程序指定的终点重合,进而损失了部分位置控制精度。

针对这些问题,在前人研究的基础上,将加工路径段进给速度的控制问题与插补前速度规划问题相结合,研究加工路径段间转接和段内进给速度规划问题,并通过计算实例验证本方法具有的优势。

## 1 插补前加减速处理

通常,数控编程人员会根据加工工艺要求计算出每段加工路径的进给速度并以 F 指令的形式体现在最后编制出的数控程序中。基于数据采样的数控系统在插补路径段时一般是以 F 给定的进给速度计算每个插补周期的轮廓控制步长,根据步长的方位矢量计算各伺服坐标轴的位移增量,如图 1 所示。

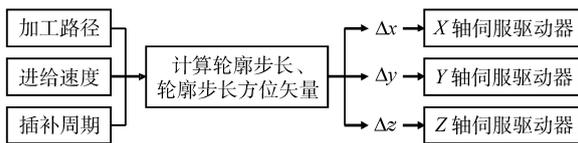


图 1 无加减速处理时的插补方式

Fig. 1 Interpolation method without ACC/DEC dealing

图 1 描述的是直接采用 F 指令指定的进给速度进行插补运算的方式。这种方式由于未考虑机床动态特性从而会导致机床振动进而降低加工质量、影响机床寿命,因此,实际数控系统会进行必要的加减速处理。

根据加减速处理环节与插补运算的位置关系可将加减速控制分为插补前加减速控制和插补后加减速控制 2 种模式,本文采用现代数控系统中常用的插补前加减速控制模式,如图 2 所示。



图 2 插补前加减速控制方式

Fig. 2 ACC/DEC dealing method before interpolation

## 2 加工路径段间转接速度规划

### 2.1 转接角的计算

如图 3 所示,两条相邻加工路径的交点为转接点,转接点处沿进给方向的单位切矢量分别为  $T_1$  和  $T_2$ 。将  $T_1$  和  $T_2$  在转接点处形成的夹角定义为转接角  $\theta$ 。

则转接角可计算为

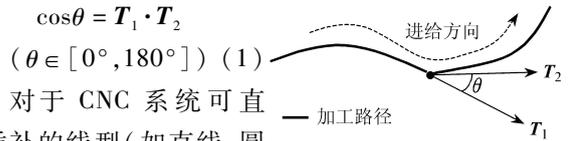


图 3 转接点与转接角  
Fig. 3 Transiting point and transiting angle

$\cos\theta = T_1 \cdot T_2$   
( $\theta \in [0^\circ, 180^\circ]$ ) (1)

对于 CNC 系统可直接插补的线型(如直线、圆弧、样条等),总可以求得线型上某点处对应的切向矢量,因此,完全可以应用式(1)计算出转接角。

### 2.2 转接条件

如图 4 所示, $P$  表示加工路径段, $S$  和  $E$  分别表示加工路径段的起点和终点, $P$ 、 $S$  和  $E$  的下标(如  $i$ )表示加工路径段的序号(如  $P_i$ 、 $S_i$  和  $E_i$  分别表示第  $i$  段加工路径、起点和终点)。

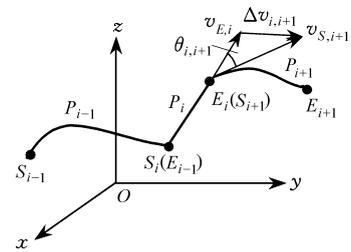


图 4 连续加工路径段

Fig. 4 Continuous machined path segments

显然对于路径段  $P_i$

$$S_i = E_{i-1} \quad E_i = S_{i+1}$$

成立。假定图 4 中当前路径段为  $P_i$ ,  $P_{i+1}$  为下一路径段,当前转接点为  $E_i$ (即  $S_{i+1}$ ),  $P_i$  在  $E_i$  处的进给速度为  $v_{E,i}$ ,  $P_{i+1}$  在  $S_{i+1}$  处的进给速度为  $v_{S,i+1}$ ,从当前路径段  $P_i$  转入下一路径段  $P_{i+1}$  的过程中进给速度变化矢量的模为  $\Delta v_{i,i+1}$ 。根据余弦定理可得

$$\Delta v_{i,i+1} = \sqrt{v_{E,i}^2 + v_{S,i+1}^2 - 2v_{E,i}v_{S,i+1}\cos\theta_{i,i+1}} \quad (2)$$

该变化量为进给速度在一个插补周期  $T$  内变化,取平均加速度为加工路径转接过程的加速度

$$a_{i,i+1} = \Delta v_{i,i+1}/T \quad (3)$$

设机床允许的最大加速度为  $a_{max}$ ,则路径段转接时不引起速度冲击的条件是

$$a_{i,i+1} \leq a_{max}$$

将式(2)和(3)代入上式并经整理后可得

$$v_{E,i}^2 + v_{S,i+1}^2 - 2v_{E,i}v_{S,i+1}\cos\theta_{i,i+1} \leq (Ta_{max})^2 \quad (4)$$

### 2.3 降速处理

当式(4)的条件不满足时,表明加工路径段转接时产生的加速度过大,大于机床能承受的最大加速度。通过降低转接点处的进给速度可有效降低转接加速度。由于一般要求进给速度曲线在转接点处连续,因此,式(4)中可设定  $v_{E,i} = v_{S,i+1} = v_{i,i+1}$ ,则有

$$v_{i,i+1} \leq \sqrt{\frac{(Ta_{max})^2}{2(1-\cos\theta_{i,i+1})}} \quad (5)$$

## 2.4 转接速度的规划

通过以上分析,现将加工路径段间转接处理过程整理为如下步骤:①数控程序在译码、刀补处理结束后,按顺序取出所有运动程序段,首加工程序段的起点进给速度和末加工程序段的终点进给速度设定为零。②确定当前路径段和相邻的下一路径段,应用式(1)求取两条路径段在转接点处的转接角。③如果两条加工路径段的编程进给速度相等,则处理的原则是保证转接速度不过冲的条件下直接转接。具体处理时,应用式(4)判断以指令进给速度

进行转接是否合适,如式(4)成立则输出转接速度为指令进给速度,否则,应用式(5)进行降速处理。④如果两条加工路径段的编程进给速度不相等时,采取尽可能以较小进给速度进行转接的原则。具体处理时,应用式(4)判断以较小的指令进给速度进行转接是否合适,如式(4)成立则输出转接速度为较小指令进给速度,否则,应用式(5)进行降速处理。

将上述转接处理过程以流程图的形式描述为图5所示。

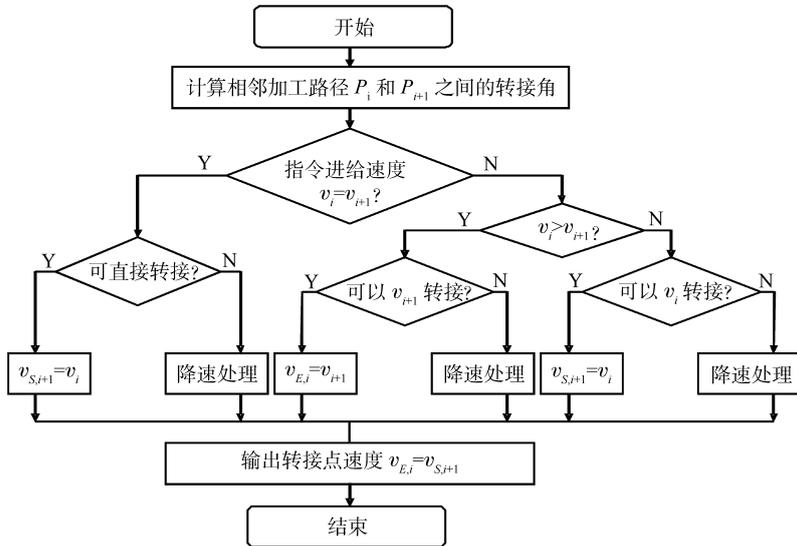


图5 转接速度规划流程图

Fig. 5 Flowchart of planning the transiting speed

## 3 加工路径段内的加减速处理

通过对加工路径间转接速度规划处理后,每个加工路径段的起点和终点速度与给定的加工指令进给速度一般都会有差别,因此,在进行实时插补前,还需对每条加工路径段进行加减速处理。现代数控系统中常用的进给速度加减速控制规律有线性加减速、指数加减速、S型曲线加减速等<sup>[7]</sup>,各种加减速控制规律各有优缺点,本文以线性加减速为例说明。

### 3.1 加减速处理原则

为适应段内速度规划结果,特提出如下段内加减速处理原则:①加工每段路径的时间均取为插补周期的整数倍。②转接点(即每条路径段的起点和终点)一定为插补点,进给速度曲线在转接点处至少应一阶连续。③某个插补周期的进给速度矢量大小为下一插补点和当前插补点所形成线段的长度除以插补周期,进给速度矢量的方向为当前插补点指向下一插补点的射线方向。

### 3.2 参数确定

加减速处理的加工路径段为  $P_i$ 、总长为  $L_i$ ,经

转接速度规划处理后的起点和终点速度分别为  $v_{s,i}$  和  $v_{e,i}$ ,数控程序 F 指令指定的进给速度  $v_i$ 。设数控系统设定的插补周期为  $T$ 、加速度为  $a$ 。图6中粗实线表示路径段  $P_i$  在理想状况下线性加减速规律的速度曲线,  $t_i$  和  $t_{i+1}$  分别对应  $P_i$  段起点和终点的时刻,  $t_A$  和  $t_D$  分别为到达加速结束点和减速点的时刻,整个过程可划分为加速区( $t_i \rightarrow t_A$ )、稳速区( $t_A \rightarrow t_D$ )以及减速区( $t_D \rightarrow t_{i+1}$ )等3个区域,其中稳速区对应的稳定速度为 F 指令进给速度  $v_i$ 。由于  $t_A$ 、 $t_D$  和  $t_{i+1}$  并非一定为插补周期  $T$  的整数倍,因而需要重新确定。图6中点划线表示经过重新处理后的速度曲线,  $t'_A$ 、 $t'_D$  和  $t'_{i+1}$  分别为新的加速结束点、减速点和终点对应的时刻,这些时刻都为  $T$  的整数倍。

### 3.3 各区相关量的计算

对于加速区( $t \in [t_i, t_A]$ ),进给速度和运行位移分别为关于时间  $t$  的函数,即有

$$v_A(t) = v_{s,i} + a(t - t_i) \quad (6)$$

$$L_A(t) = \frac{1}{2}(v_{s,i} + v_A(t))(t - t_i) \quad (7)$$

成立。由于  $v_A(t_A) = v_i$ ,将  $t = t_A$  代入式(6)中可得

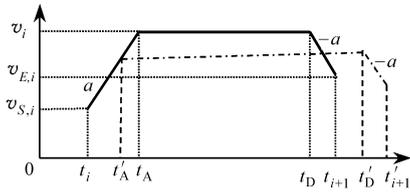


图 6 线性加减速的速度梯形图

Fig. 6 Trapezoid drawing of linear ACC/DEC

加速区预计运行时间为

$$T_A = t_A - t_i = \frac{1}{a}(v_i - v_{S,i})$$

则预计加速区所需插补周期个数为

$$N_A = [T_A / T]$$

式中,算子 [ ] 表示对浮点数取整。

所以实际在加速区运行的时间和到达加速结束点的时刻分别应为

$$T'_A = TN_A$$

$$t'_A = t_i + T'_A$$

将  $t = t'_A$  代入式(6)和(7)中可分别计算出到达加速结束时刻的进给速度和在加速区的运行总位移

$$v'_A = v_A(t'_A) = v_{S,i} + aT'_A$$

$$L'_A = L_A(t'_A) = \frac{1}{2}T'_A(v_{S,i} + v'_A)$$

同理,对减速区可以首先估算出预计运行时间

$$T_D = \frac{1}{a}(v_i - v_{E,i})$$

所需插补周期个数  $N_D = [T_D / T]$ 、

实际在减速区运行的时间  $T'_D = TN_D$ 、减速点时刻的进给速度  $v'_D = v_{E,i} + aT'_D$ 。

实际在减速区的运行总位移为

$$L'_D = \frac{1}{2}T'_D(v_{E,i} + v'_D)$$

由于加工路径段  $P_i$  的长度  $L_i$  是一定的,所以图 6 中点划线部分与时间轴围成的面积应该与粗实线部分相等,都等于  $L_i$ 。因此实际在稳速区总的运行位移为

$$L'_W = L_i - L'_A - L'_D$$

经过上述处理后,进入稳速区时的进给速度为  $v'_A$  而离开稳速区进入减速区时的进给速度为  $v'_D$ 。一般地,  $v'_A$  与  $v'_D$  并不相等,但是它们的大小已经非常接近指令速度  $v_i$ ,因此可以取二者的平均值作为整个稳速区的进给速度

$$v_w = \frac{1}{2}(v'_A + v'_D)$$

则在稳速区运行的预计时间和插补周期个数分别为

$$T_w = L'_W / v_w$$

$$N_w = [T_w / T]$$

实际在稳速区运行的时间和进给速度分别为

$$T'_w = TN_w$$

$$v'_w = L'_W / T'_w$$

实际到达加工路径段终点的时刻为

$$t'_{i+1} = t_i + T'_A + T'_w + T'_D = t_i + T(N_A + N_w + N_D)$$

### 3.4 段内加减速处理流程

通过以上分析,在加工路径段间速度规划后进入实时插补计算前可插入如图 7 所示的加减速前瞻处理流程。

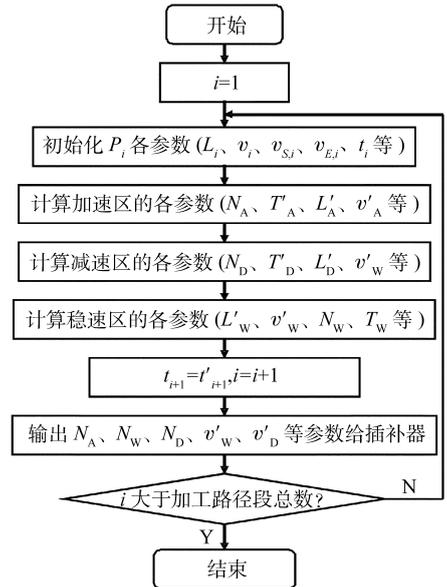


图 7 加减速处理流程图

Fig. 7 Flowchart of ACC/DEC dealing method

### 4 算法实现与实例计算

应用 VC + + 6.0 编程实现了本文提出的速度规划及加减速前瞻控制算法,算法总体框架结构如图 8 所示。



图 8 总体框架结构

Fig. 8 Frame structure of the proposed methods

假定有如下数控加工程序:

N0080 G90 G94 G00 X0 Y0 Z0;

N0090 G01 X10 Y10 Z0 F1500;

N0100 X0 Y0 Z14.142;

N0110 Y10 Z0 F1000;

N0120 X10;

N0130 G74;

相应的加工路径如图 9 所示。

加工路径由 4 段空间直线 ( $P_1 \sim P_4$ ) 组成,经计算各段间的转接角分别为:  $\theta_{1,2} = 135^\circ$ 、 $\theta_{2,3} = 150^\circ$ 、 $\theta_{3,4} = 90^\circ$ ;使用的机床参数:  $T = 4 \text{ ms}$ 、 $a_{\max} = 0.5g$  ( $g$  为重力加速度)、 $a = 200 \text{ mm/s}^2$ 。采用 Mathematica 软件绘制进给速度 ( $v$ ) 关于插补周期个数 ( $N$ ) 的曲

线图(图10),图中实线部分为采用一般加减速处理方式,虚线部分为本文的处理方式。通过本文对转接过程的前瞻处理能在一定程度上提高加工效率(平均每段加工路径约提高2%),因此,在加工路径段转接时,并非一定要进行零速度转接,在允许的情况(如机床动特性、加工精度要求等)下灵活处理,这样能在一定程度上提高加工效率。

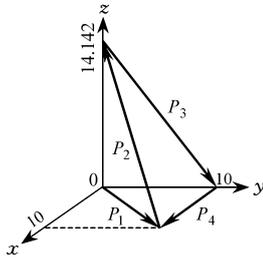


图9 加工路径实例  
Fig. 9 Example of the machined paths

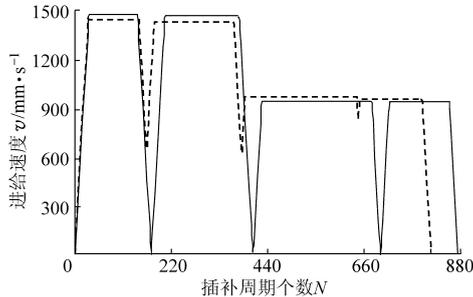


图10 进给速度曲线

Fig. 10 Curves of feed-speed

为直观比较几种方法,现将一些主要指标如表1所示。

## 5 结论

(1) 通过建立加工路径段间速度转接模型和能

表1 不同方法的主要指标

Tab. 1 Main parameters of different methods

采用方法	插补周期数 $N$	运行总时间 $t/s$	冲击加速度 $a/mm \cdot s^{-2}$	平均进给速度 $v/mm \cdot s^{-1}$
无加减速处理	751	3.004	$\infty$	20.44
一般加减速	871	3.484	设定加速度	17.62
本文提出方法	809	3.236	$< a_{max}$	19.00

否直接转接的条件,研究对比发现在该条件允许时,对段间的转接速度进行前瞻规划处理后能使加工效率得以较大提高,特别是在运行巨量数控程序(数百兆字节以上)时效果更显著。

(2) 本文方法在高速切削加工中可以体现出更好的应用价值。因为高速加工时的路径段间一般处理为二阶连续(即段间转接角为零度)而且具有较高的进给速度,如果段间进行零速度转接势必频繁加减速而导致加工过程不流畅,可能还会影响到最终的加工结果。采用本文方法后在某些转接点可能仅适当降低速度甚至可能不必降速而直接转接,从而能尽可能地保证高速加工过程的连续性。

(3) 使用本文提出的加减速前瞻处理方法能有效避免插补前加减速控制方式中减速点和终点的判别问题。对数控程序进行前瞻处理时只需将每个加工路径段内加速区、稳速区和减速区分别计算出有多少个插补周期并存储即可,从而大大减轻了插补器的计算任务,提高了插补器的执行效率。

## 参 考 文 献

- 任 锃,傅建中,陈子辰. 高速加工中速度前瞻控制新算法研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2006,40(11):1985~1988. Ren Kun, Fu Jianzhong, Chen Zichen. New look-ahead algorithm for velocity control in high speed machining[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2006, 40(11):1985~1988. (in Chinese)
- 董伯麟,王治森,韩江. 高速高精度加工中NURBS曲线混合插补算法[J]. 农业机械学报,2008,39(6):174~178. Dong Bolin, Wang Zhisen, Han Jiang. NURBS curve hybrid interpolator in high speed and high accuracy machining[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6):174~178. (in Chinese)
- 彭芳瑜,何莹,李斌. NURBS曲线高速插补中的前瞻控制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(5):2~6. Peng Fangyu, He Ying, Li Bin. Look-ahead control in high feed rate NURBS curve interpolation[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(5):2~6. (in Chinese)
- 徐志明,冯正进,汪永生,等. 连续微小路径段的高速自适应前瞻插补算法[J]. 制造技术与机床,2003(12):18~20.
- 王宇晗,肖凌剑,曾水生,等. 小线段高速加工速度衔接数学模型[J]. 上海交通大学学报,2004,38(6):12~15. Wang Yuhuan, Xiao Lingjian, Zeng Shuisheng, et al. An optimal feedrate model and solution for high-speed machining of small line blocks with look-ahead[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(6):12~15. (in Chinese)
- 邬义杰,商允舜. 微小直线段插补终点控制算法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2006(2):2~3. Wu Yijie, Shang Yunshun. Study on control algorithm for micro-line interpolation end-point[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2006(2):2~3. (in Chinese)
- 曹宇男,王田苗,陈友东,等. 插补前S加减速在CNC前瞻中的应用[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(5):21~24. Cao Yu'nan, Wang Tianmiao, Chen Youdong, et al. Application of pre-interpolation S-shape acceleration/deceleration in CNC look-ahead interpolation algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(5):21~24. (in Chinese)